

국내산 소나무의 목리방향에 따른 Self-tapping screw의 지압강도 평가

Evaluation on Bearing Strength of Self-Tapping Screws Depending on the Grain Direction of Red Pine

In-Hwan LEE¹ · Keonho KIM^{1,†} · Kug-bo SHIM¹

¹Wood Engineering Division, Forest Products and Industry Department, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Korea

초록 : 본 연구에서는 소나무를 CLT로 이용하기 위해 층재의 지압강도 시험을 실시하였다. 파스너는 최근 CLT 파스너로 널리 사용되는 STS(지름 8, 10, 12 mm)를 사용하였다. 지압강도는 STS의 형상을 고려하여 나사산 유무와 섬유방향에 따라 비교 검토하였다. 실험결과 STS의 지름이 클수록 소나무 각재의 모든 방향에서 높은 항복하중을 보였다. STS의 나사산이 있는 부분이 나사산이 없는 부분보다 높은 지압강도를 보였다. 소나무각재의 방향별로는 하중방향과 목리방향이 평행한 횡단면의 지압강도가 가장 높았으며, 접선단면이 가장 낮은 지압강도를 보였다. 섬유평행방향 지압강도는 평균 23.43 MPa로 섬유수직방향 지압강도인 평균 16.16 MPa보다 약 45% 높았다. STS를 사용한 소나무 CLT의 지압강도는 EN, KBC의 예측식으로 산출한 예측치와 비교한 결과 낮게 측정되었다. 이에 따라 STS 형상을 고려한 지압예측식이 필요할 것으로 사료된다.

1. 서론

목구조에 쓰이는 접합부는 구성재료와 필요한 구조성능에 따라 다양하다. 경골목구조는 못 접합부가 주로 쓰이고 중목구조는 볼트와 드립트 핀 등이 많이 쓰인다. 고층화 공학목재인 CLT는 목재의 고부가가치화에 선두에 있으며 다양한 연구가 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2021; Jang and Lee, 2019; Jung *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021). CLT는 면재료의 특성을 고려하여 lag screw, STS(self-tapping screw), ring screw 등이 개발되었으며, 시공에 따른 제품에 대한 설계값을 제시하고 있다.

STS는 부위별로 tip과 shank cutter 및 thread 등으로 구분된다. 각 부위는 목재에 구멍 가공없이 삽입할 수 있도록 하며, STS 삽입과정에서 생성된 칩과 목분의 절단/배출을 최소화한다. STS 나사산의 각도와 배출되지 않은 칩과 목분에 기인하여 최소화된 STS와 목재사이의 간격은 STS와 목재가 스스로 결합되도록 한다. 이러한 특징으로 STS는 목조건축물의 중요한 파스너로 널리 쓰이고 있다. 세계적인 목조건축물 시장, 유럽의 영국과 독일 같은 국가에서 STS는 중요한 목구조 파스너로 시장 점유율을 높이고 있으며 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다(Bedon and Fragiocomo, 2019; Dietsch and Brandner, 2015; Ringhofer *et al.*, 2015; Sullivan *et al.*, 2018).

구조용집성재나 구조용직교집성판(CLT)에 파스너를 사용한 목구조물 접합부의 기준허용내력은 목재의 지압강도와 파스너의 휨 특성에 근거한 EYM(European Yield Model)을 사용하고 있다. 목재의 비중과 지압강도는 유의미한 상관관계가 있으며(Santos *et al.*, 2010), 이방성 재료인 목재는 목리방향에 따라 상이한 지압강도를 보인다(Hwang and Komatsu, 2002). CLT는 각 층재의 섬유방향이 직교되어 적층되기 때문에 접합부에 삽입된 파스너가 하중을 받을 때 목리 방향에 따라 다른 지압강도 성능을 보인다. 따라서 구조용 직교집성재는 파스너와 목재 간 목리방향별 지압강도 성능 검증이 필수적이다.

소나무는 대한민국 전체 산림의 66.8%를 차지하고 임목축적은 70.35%로 가장 중요한 임산자원이며, 조립량도 편백나무와 낙엽송 다음으로 많은 수종이다(임업통계연보, 2020). 그러나 일반제재업에서 국산 원목 이용률은 18%이고 그중 소나무

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 50(1): 1-11. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.1.1>

의 사용량은 16.6%로 상당히 저조하다. 소나무는 톱밥(45.1%)과 목재 펠릿(17.4%), 칩(15.9%)으로 대부분 이용되며, 일반 제재업에서의 활용비율은 3.1%로 미비하기 때문이다(목재이용실태조사, 2020). 이에 따라 국내산 소나무의 고부가가치화를 위해 구조용재로 활용을 위한 연구가 이뤄지고 있다(Hong et al., 2017; Kim et al., 2013; Kim et al., 2015). Hwang and Komatsu(2002)는 EN383과 ASTM D5764 표준에 따라 수행된 소나무(*Pinus pinaster*)의 지압강도 연구결과 구조용 목재로의 활용가능성을 제시하였다.

본 논문에서는 국내산 소나무를 CLT로 활용할 기초 연구로써 STS를 이용한 국내산 소나무의 지압강도 성능을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 재료

공시재료는 평균 함수율 13%의 소나무(*Pinus densiflora*)(50(T) × 50(W) × 3,600(L) mm)를 길이 50 mm로 제재하여 사용하였다. 지압강도 시험에 사용한 파스너는 Rothoblaas사(Italia)의 STS(Galvanized carbon steel)로 하였다(Fig. 1). STS 지름(d_1)에 따라 8, 10, 12 mm 3종류로 구분하였으며, 길이(L)는 120 mm를 사용하였다. Shank의 지름(d_s)은 5.8, 7, 8 mm였으며, Shank cutter의 지름(d_c)은 6.8, 8.4, 9 mm로 shank 지름보다 크다.

2.2. 시험편 제작

지압강도 시험편은 소나무 원목을 나이트 중심으로 4등분하여 정목제재(quarter sawn)한 정목각재를 사용하였다. KS F 2156에 따라 50 × 50 × 50 mm로 제재된 정목각재는 횡단면(L), 방사단면(R), 접선단면(T) 즉 삼단면이 명확한 시험편으로 선별하였다(Fig. 2).

STS를 사용할 때는 사전 구멍 가공이 필요하지 않지만 지압강도 시험편은 KS F 2156에 의거하여 고정될 홈을 가공하였다. 홈은 동일 수종 시험편 두 개의 같은 단면을 마주보도록 클램프로 압제한 후 마주보는 단면 중앙에 STS의 d_1 (6, 7, 8 mm)와 같은 지름으로 사전에 구멍을 가공하였다. 구멍이 가공된 시험편은 지압강도 시험 예정인 STS(8, 10, 12 mm)를 구멍이 가공된 곳에 삽입후 제거하여 나사산 길을 미리 가공하였다. 지압강도 시험편은 STS의 thread로 지압하는 시험편(T-type)과 shank로 지압하는 시험편(S-type) 두 가지로 구분하였다. STS가 삽입된 목재의 shank 부분에도 thread가 나사산 길을 만들기 때문에 T-type과 S-type 모두 지압강도 시험편 홈에 나사산 길을 가공하였다. 나사산이 가공된 소나무 각재 시험편의 형상은 Fig. 3과 같았다.

시험편의 명명법은 STS 기준 지름(d_1)과 지압하는 부위에 따라 8T, 8S, 10T, 10S, 12T로 명명하였다. 지름 12 mm의 STS는 S부위의 길이가 40 mm로 시험편의 길이보다 짧아 포함하지 않았다. 시험편은 STS의 지름과 지압부위 및 소나무의 삼단면 그리고 반복수 적용하여(5 × 3 × 10) 총 150개를 제작하였다. 각 유형의 이름은 Table 2와 같이 명명하였다.

2.3. 시험방법

제작이 완료된 소나무 각재 시험편은 습도 65%의 항온항습실에서 항량에 도달할 때까지 조습처리한 후 무게 및 평균연료폭을 측정하였다. 평균연료폭은 각 시험편의 횡단면을 기준으로 측정하였으며, 하나의 조제와 만재를 1연료로 측정하여 평균 연료폭을 산출하였다.

지압강도 시험방법은 KS F 2156를 기초로 하였다. T-type은 소나무 지압강도는 tip부위를 제외하고 thread부분만 접촉되도록 홈에 삽입하여 시험을 실시하였다. S-type은 shank와 shank cutter를 모두 포함하여 홈에 STS를 삽입 후 시험을 하였다. 준비된 시험편은 만능재료시험기(Instron 5585)의 30t 로드셀을 0.5 mm/min의 속도로 압축하중을 가하였다(Fig. 4). 압축하중과 변형은 Instron 5585로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하중-변형선도

소나무 지압강도 시험편은 평균 비중은 0.45 ± 0.033 으로 대부분 문헌의 소나무 비중(0.41~0.55) 범위안에 있었다(Table 2, Kim, 2012; Park et al., 2006). 시험편의 평균연료폭은 4.44 mm이었으며, 변동계수 19.34%로 변동 폭이 크게 나타났다.

Fig. 5는 STS를 이용한 소나무 지압강도 시험편의 하중-변형 곡선이다. 시험편의 섬유방향이 하중방향과 평행한 횡단면 시험편(PL)은 시험편이 파괴되거나 하중이 급격히 감소하는 구간이 명확하여 최대하중과 비례한계하중(proportional limit)

을 측정하였지만, 섬유방향과 하중방향이 수직인 방사단면 시험편(PR)과 접선단면 시험편(PT)의 경우 목리수직방향 부분압축시험과 같이 탄성영역을 지나 소성영역에서도 지속적으로 하중이 증가하여 최대하중을 측정하지 못하였다. PR 시험편과 PT 시험편은 할렬파괴를 보이지 않았다(Fig. 6). 하중방향과 섬유방향이 평행한 시험편은 STS의 지름이 증가할수록 비례한계하중이 증가하는 경향을 보였다.

하중방향과 섬유방향이 수직인 시험편(PR, PT)의 비례한계하중은 다음과 같다. T-type(P@8T, P@10T, P@12T)은 STS의 지름이 증가할수록 비례한계하중이 증가되었지만 S-type(P@8S, P@10S)은 P@8S보다 지름이 큰 STS를 사용한 P@10S가 더 낮은 비례한계하중을 보였다. 이러한 이유는 파괴형상에서 찾아볼 수 있다(Fig. 8). T-type은 S-types보다 비례한도하중 값이 증가하였다(Table 3).

3.2. 소나무 각재의 5% offset 지압강도

지압강도 시험편의 항복하중 값은 KS F 2156에 따라 Fig. 7과 같은 방법으로 산출하였다. 지압강도는 5% offset 지압강도를 STS가 목재 시험편에 지압되는 부분의 투영면적으로 나누어 산출하였다.

- ① 하중-변형 곡선의 초기 직선영역을 나타내는 직선을 그린다.
- ② ①번 직선을 STS 지름의 5% 만큼 수평축의 오른쪽 방향으로 평행이동시켜 하중-변형 곡선의 교점의 하중을 5% offset 지압강도 즉, 유사 항복하중으로 산출하였다.

$$B_T = P_y / (a \times d), \quad B_S = P_y / \{(a_s d_s + a_c d_c)\}$$

B_T : STS Thread 부분 지압강도

P_y : 유사 항복하중

a : 시험편의 길이

d : STS Thread 지름

B_S : STS Shank+shank cutter 부분 지압강도

a_s : STS Shank 길이

d_s : STS Shank 지름

a_c : STS Shank cutter 길이

d_c : STS Shank cutter 지름

Table 4는 STS를 이용한 소나무각재의 평균 항복하중과 지압강도이다. 항복하중은 12 mm STS T-type의 횡단면을 지압한 시험편(PL12T)이 11.85kN으로 가장 높게 측정되었으며, 8 mm S-type 접선단면을 지압한 시험편(PT8S)이 4.75kN으로 가장 낮은 값을 보였다. T-type(8T, 10T, 12T)과 S-type(8S, 10S) 대부분이 지름이 클수록 항복강도가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 섬유방향과 하중방향이 평행한 PL 시험편의 경우 8S 시험편보다 10S 시험편의 항복하중이 더 낮은 값을 보였다. 이런 경향은 최대하중 값과는 상반되는 결과이다. PL 시험편의 S-type 최대하중은 섬유방향의 높은 강성으로 8S보다 10S가 높은 값이 측정되었으나, 항복하중은 shank와 shank cutter의 지름차이로 shank cutter에 하중이 집중되어 목재 파괴로 더 낮게 측정된 것으로 판단된다(Fig. 8).

지압강도는 투영면적에 기인하여 모든 시험편이 STS의 지름이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, T-type보다 S-type의 지압강도가 높게 측정되었다. STS의 thread 부분의 지름(8, 10, 12 mm)보다 shank 부분의 지름(5.8, 7, 8 mm)이 작아서 이러한 결과가 산출된 것으로 사료된다. 소나무의 방향별 항복하중과 지압강도는 접선단면 < 방사단면 < 횡단면 순으로 높은 값이 산출되었다.

3.3. 소나무 지압강도 예측식을 통한 실측치 비교검토

소나무의 섬유방향에 따른 R방향과 T방향 지압강도 강도비를 Table 4에 산출하였다. 할렬파괴된 10S 시험편을 제외한 모든 시험편의 섬유방향에 따른 강도비는 0.61~0.69로 측정되었다.

북미 목구조 기준인 NDS의 경우 2018년에 CLT에 대한 적용사항을 추가하였으며, CLT 지압강도는 제조 특성상 층재의

섬유방향 지압강도 비를 적용한 유효지압길이로 산출하도록 제안하고 있다. 따라서 섬유방향에 따른 하중방향별 소나무 구조용재의 STS지압강도 예측식은 추후 소나무 CLT 지압강도 예측식에 중요한 인자로 적용될 것이다. 국내 건축구조기준(KDS)내 목재의 지압강도 예측식은 섬유방향에 따라 파스너의 종류에 따라 제안된다. 유럽의 Eurocode 5는 자국의 수종을 중심으로 실험을 통해 얻어진 예측식을 적용하고 있다. STS 파스너의 경우 아직 국외표준에 지압강도 예측식은 제안되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 소나무의 섬유방향별 STS 지압강도를 예측하기 위해 유사한 형상의 래그스크류 지압강도 예측식(KDS와 Eurocode 5)을 적용하여 비교 분석하였다(Table 5).

$$\text{KDS(NDS)} : F_{e\parallel} = 79G, F_{e\perp} = \frac{216G^{1.45}}{\sqrt{d}}$$

$$\text{Eurocode 5: } F_{e\parallel} = 0.082(1-0.01d)\rho, F_{e\perp} = \frac{0.082(1-0.01d)\rho}{1.35+0.015d}$$

F_e : Bearing strength formula

G: Specific gravity (-)

d: Fastener diameter (mm)

ρ : Average density (N/mm³)

분석결과, KDS와 Eurocode 5의 지압강도 예측 결과는 비슷하였으며, 실측 지압강도와는 차이가 있었다(Fig. 9). 섬유 수직방향의 경우 8T, 10T, 12T 시험편의 실측치는 EN 예측치보다 각각 53%, 53%, 47% 낮게 측정되었고 8S, 10S는 22%, 27% 낮게 측정되었다. 섬유 평행방향도 비슷한 경향을 보였다. 이는 STS의 Thread 부분의 d_1 과 d_2 의 지름차이가 일반적인 래그스크류에 비해 크고 나사산의 간격도 넓지만, 일괄적으로 d_1 의 지름을 수식에 적용한 결과로 보인다. Shank 부분은 래그스크류와 지름이 비슷하기 때문에 비교적 차이가 적었으나 Shank cutter 부분에서 파괴가 집중되어 예측치가 낮게 산출된 것으로 분석된다. KDS 및 EN의 예측식은 최대하중을 기준으로 지압강도를 산출한 방법이고 KS F 2156에서는 5% offset yield load를 기준으로 지압강도를 산출한 방법이기 때문에 이로 인한 차이의 가능성 또한 크다고 사료된다.

래그스크류와 STS의 구조적 차이 때문에 래그스크류에 적용된 실험식 계수는 STS에 적용하기 적합하지 않아 보인다. 추후 Thread 부분의 d_1 과 d_2 의 지름과 shank 및 shank cutter 계수를 적용하고, 다양한 비중의 목재로 STS에 대한 지압강도를 산출하여 적합한 실험식계수를 산출한다면 STS에 적합한 예측식을 제안할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구진은 추후 다양한 수종에 대한 STS의 지압강도를 산출하여 적합한 실험식을 도출할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 STS를 이용하여 국산 소나무 섬유방향에 따른 방향별 지압강도를 산출하였다. STS는 8 mm, 10 mm, 12 mm로 지름이 커질수록 소나무의 모든 섬유방향에서 높은 항복하중 값을 보였다. STS의 나사산이 존재하는 부분은 존재하지 않는 부분보다 11% 낮은 강도 값을 보였다. 소나무각재의 방향별 지압강도는 하중방향과 목리방향이 평행한 시험편이 가장 양호했으며, 접선단면이 가장 낮은 지압강도를 보였다. 방사단면의 지압강도는 횡단면보다 19.3%, 접선단면의 지압강도는 횡단면보다 42% 낮았다. 방향별 강도비는 목리방향과 하중방향이 평행한 시험편 기준 0.7로 산출되었다. 래그스크류를 이용한 목재의 지압강도 예측식을 적용한 결과 STS 지압강도 예측에는 적합하지 않았다. 추후 다양한 비중의 수종으로 지압강도를 산출하여 실험식을 도출한다면, 비중에 따른 STS를 이용한 지압강도 예측식을 제안할 수 있을 것으로 보인다.